

자동화 컨테이너 터미널에서 수직형 블록의 이적작업을 위한 할당 및 작업순서

배종욱* · 박영만** · 김갑환***

*전남대학교 교통물류학부, **해군사관학교 경영과학과, ***부산대학교 산업공학과

Assignment and Operation Sequencing for Remarshalling of a Vertical Yard Block in Automated Container Terminals

Jong-Wook Bae* · Young-Man Park** · Kap Hwan Kim***

*Department of Transportation and Logistics, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

**Department of Management Science, Korea Naval Academy, Jinhae 645-797, Korea

***Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

요 약 : 이적작업은 적하작업과 반출작업을 신속하게 처리하기 위해 자동화 컨테이너 터미널에서 중요하게 고려하는 운영 전략들 중의 하나이다. 이는 ATC(Automated Transfer Crane)의 운반시간과 채취급 작업시간을 줄이기 위해 장치장 블록에 산적되어 있는 컨테이너들을 재배치하는 작업이다. 본 논문은 가능한 컨테이너 이동을 최소화하면서 한 수직형 블록 내에 장치된 컨테이너들의 배치 형태를 바람직한 배치 형태로 전환시키기 위한 이적계획 문제를 다룬다. 이 문제는 선후관계를 가지는 2개의 하위 문제 즉, 장치위치 할당문제와 장비 작업순서 문제로 분할된다. 장치위치 할당문제는 운반시간의 관점에서 현재 장치되어 있는 컨테이너들 중에서 어떤 컨테이너를 어느 베이에 옮길 것인가를 결정한다. 이의 결과를 가지고 장비 작업순서 문제는 장치 공간의 제약을 고려하여 ATC의 이동시간을 최소화하는 작업순서를 정한다. 본 연구에서는 정수계획법과 동적계획법을 이용하여 각 하위문제를 모형화 하였다. 제안된 모형을 이용하여 이적계획 과정을 설명하기 위한 예제를 제시하였다.

핵심용어 : 컨테이너 터미널, 이적작업, 혼합정수계획법, 동적계획법, 적하작업, 반출작업, ATC

Abstract : Remarshalling operation is one of the operations considered important in an automated container terminal to perform quickly loading operations and delivery operations. It arranges the containers scattered at a vertical yard block in order to reduce the transfer time and the rehandling time of ATC(Automated Transfer Crane)s. This paper deals with the remarshalling planning problem minimizing the weighted operation time. This problem can be decomposed into 2 subproblems, storage space assignment problem and operation sequencing problem. Storage space assignment problem decides to where containers are transported in terms of transportation time cost. With results of a previous subproblem, operation sequence problem determines the ATC operation sequence, which minimizes the dead-heading of ATC. This study formulates each subproblem with mixed integer program and dynamic program. To illustrate the proposed model, we propose an instance to explain the process of remarshalling planning.

Key words : Container terminal, Remarshalling, Mixed integer programming, Dynamic programming, Loading operation, Delivery operation, ATC

1. 서 론

적하작업시간과 반출작업시간은 선사와 화주에 대한 컨테이너 터미널의 서비스 수준을 판단하는 중요한 평가척도들이다. 적하작업은 수출 컨테이너를 컨테이너선에 싣는 작업이고 반출작업은 수입 컨테이너를 외부 트럭에 옮기는 작업이다. 적하작업시간은 하역장비가 장치장에 있는 수출 컨테이너를 집어 내부 이송장비에 전달하는 시간, 내부 이송장비가 C/C(Container Crane)까지 컨테이너를 운반하는 시간, C/C가

컨테이너를 선박에 싣는 시간으로 구성된다. 반출작업시간은 하역장비가 장치장에 있는 수입 컨테이너를 집어 외부 트럭에 전달하는 시간으로 결정된다. 따라서 적하작업시간과 반출작업시간의 단축하기 위해서는 하역장비가 대기 위치에서 장치 위치까지의 빈 이동시간 그리고 장치 위치에서 연계 작업지점까지의 운반시간이 단축되어야 한다.

일반적으로 터미널 운영자는 작업시간 단축을 위해 적하작업 또는 반출작업에 투입되는 C/C, YT(Yard Tractor) 또는 TC(Transfer Crane)의 대수를 증가시키거나 장치장 계획, 장

* 대표저자 : 배종욱(정회원), jwbae@chonnam.ac.kr 011-9518-0884

** 정회원, ymanpank@pusan.ac.kr

*** 종신회원, kapkim@pusan.ac.kr 051)510-2419

비 운영계획 등의 효율화를 모색한다. 특히, 장치장 계획은 장비의 생산성뿐만 아니라 장치공간의 효율적 활용과 직접적인 관련이 있다. 본선작업의 측면에서 장치장 계획은 YT와 TC의 효율성을 높이기 위해 본선작업이 수행되는 선박의 접안위치와 근접한 저장위치를 확보한다. 또한 적하작업 및 반출작업에서의 재취급 작업(rehandling operation)의 발생과 작업 불가능 공간을 줄이기 위해 동일 특성의 컨테이너를 같은 공간에 모아둔다. 그러나 적하계획(stowage plan), 베이계획(bay plan) 등의 양적하 작업에 대한 정보를 반입 작업 과정에서 정확히 파악하기 어렵고 반출입 작업에 많은 가변성이 존재하기 때문에 장치장 계획만으로 적하작업과 반출작업을 효율적으로 수행하는 것은 매우 어렵다. 이러한 장치장 계획의 단점을 보완하기 위한 터미널 운영자가 활용하는 중요한 운영 전략의 하나가 이적작업(remarshalling operation)이다.

이적작업은 적하 혹은 반출 작업이 수행되기 전에 장치장의 여기저기에 흩어져 있는 유사한 특성의 컨테이너들을 같은 공간에 모으거나 장치위치를 이동시키는 재배치 작업이다. 그러나 지금까지 컨테이너 터미널에 대한 연구에서 이적작업이 심도 깊게 다루어지지 않은 이유는 이적작업에 장비와 인력의 추가 투입이 필요하고 이적계획 수립에 변동적 요인이 많기 때문이다.

그렇지만 무인화된 첨단 장비로 운영되는 자동화 컨테이너 터미널에서는 이러한 장애 요인들이 상당 부분 해소될 수 있다. 수동 컨테이너터미널에 비해 추가 작업에 대한 부담이 적고 장비 운영에서 보다 정밀하고 예측 가능한 계획의 적용이 가능하기 때문이다.

이적작업은 컨테이너들의 배치 정보를 고려하여 수립된 이적계획에 따라 수행된다. 그러나 이적계획 수립 방법은 하역장비의 운영방법이나 터미널 운영전략에 따라 달라진다. 본 연구에서 고려하는 자동화 컨테이너 터미널의 경우에도 장치공간 단위인 블록(block)의 배치 형태에 따라 다른 방법을 적용해야 한다. 따라서 본 연구는 장치장 하역장비의 이동 방향이 C/C의 이동 방향과 수직을 이루도록 블록이 배치된 수직형 자동화 컨테이너 터미널을 연구 대상으로 정한다. 수직형 터미널에서는 블록에 운영되는 하역장비의 대수가 고정되고 하역장비가 다른 블록으로 이동하지 않으므로 이적작업은 한 블록 내에서 수행된다. 본 연구의 주요 내용은 수직형 자동화 컨테이너 터미널에서 컨테이너의 이적작업을 어떻게 계획할 것인가이다. 그리고 본 연구의 목적은 이적작업비용을 최소화 하면서 적하 및 반출작업시간을 단축시키는 이적계획의 해법을 제시하는 것이다.

최근 항만 운영의 중요성이 인식되면서 다양한 분야에서 연구들이 진행되고 있다. 본 연구와 밀접한 연구 분야로는 장치장 운영 전략, 장치장 계획 및 위치결정, 재취급 작업계획 등이 있다.

Castilho와 Daganzo(1993)는 컨테이너 터미널의 공간 할당 문제를 처음 다루었고 상세히 문제를 정의한 점에서 가치가 인정된다. 이 연구에서는 예약 공간, 장치 공간, 신규

여유 공간 등의 공간 할당 문제를 이해하기 위한 개념들을 소개하고 있다. 김동조와 박영택(1996)은 터미널 운영방법의 중요한 요소인 컨테이너 장치위치 결정법에 출고지역, 출고 날짜, 무게 등의 복합 결정요소를 적용하여 이를 자동화하는 계획시스템을 구현한 사례를 소개하고 있다. 박강태(1997)는 선박의 재항시산을 줄이기 위해서 컨테이너 터미널의 수출 장치장 공간할당에 관한 연구를 소개하였다. Kim과 Kim(1999)은 수입 장치장을 운영하는데 특징적으로 나타나는 재취급 작업을 분석하였고, 이것을 수입 장치장 운영과 관련된 의사결정에 포함시켜서 다루었다. Kim 외 2인(2000)의 연구에서는 수출 컨테이너의 무게 등급을 고려하여 재취급 작업을 최소화하는 구체적인 장치위치의 결정문제가 다루어졌다.

컨테이너 터미널에서 수출 컨테이너의 재배치에 관한 Kim과 Bae(1998)의 연구에서는 작업배분과 하역장비의 작업순서의 문제로 분할하여 해법을 제시하였다. 그렇지만 제시된 방법은 이적작업에서 YT 또는 AGV와 같은 이송장비와 복수의 ATC(Automated Transfer Crane)를 필요로 하기 때문에 본 연구에서 다루는 자동화 컨테이너 터미널의 배치 형태에는 적용이 어렵다. 윤원영 외 2인(2003)은 자동화 컨테이너 터미널의 이적작업에 무작위(random) 할당방법과 DOS(Duration of stay) 할당방법을 적용시켜 양적하 작업과 반출입 작업에서 ATC의 작업시간 변화를 비교하였다. 그러나 이는 운영규칙에 대한 비교연구로서 구체적인 이적작업의 계획을 다루지 않았다. 강제호 외 3인(2005)의 연구에서는 재취급 최소화를 고려한 이적작업에 대한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 그러나 이 연구에서는 적하 컨테이너를 이적할 목적 베이에 충분한 장치공간이 항상 존재하고 베이 내에서의 반출 순서가 사전에 정해져 있다고 가정하였고 이적작업에 소요되는 비용 및 적하작업에서의 ATC 이동비용 등을 고려하지 않았다.

이적작업과 관련된 기존 연구들은 자동화 컨테이너 터미널에서 ATC의 이동시간과 장치위치에 대한 특성을 제대로 반영하지 못하였거나 비현실적 가정을 전제로 연구되어 현실 적용에 많은 문제점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 ATC와 이송장비의 작업지점 등의 자동화 컨테이너 터미널이 지니는 특성들을 반영하여 이적계획문제를 다루고자 한다. 본 연구에서 블록 내 이적작업은 1대의 ATC가 한 블록 내에 산재되어 있는 적하 컨테이너들을 해측 TP에 가까운 베이로 장치공간의 여유를 감안하여 이동시간을 최소화하면서 동일 특성의 컨테이너를 모아서 장치시키는 작업과정의 의미한다.

2장은 수직형 자동화 컨테이너 터미널에서 이적작업의 특성을 살펴보고 2단계의 의사결정 과정을 설명한다. 이적계획에서 장치위치 결정 문제를 혼합정수계획모형을 통해 3장에 제시하고 4장에서는 동적계획모형을 가지고 장비 작업순서 문제를 다룬다. 5장은 앞서 제안된 모형들을 이용하여 이적계획 결과의 적용예와 수치실험의 결과를 보여주고 마지막 장에서

는 본 연구의 결론과 향후 연구를 정리하였다.

2. 자동화 컨테이너터미널의 이적작업

Fig. 1은 수직형 자동화 컨테이너 터미널의 배치를 묘사하고 있다. 장치장 하역장비와 이송장비의 연계 지점은 야드 블록(block)의 양끝에 설치되어 있다. 이는 무인으로 운행되는 내부 이송장비와 외부 반출입 트럭의 이동 흐름을 분리하여 차량 혼잡과 사고를 예방하기 위한 것으로 네덜란드 ECT(Europe Combined Terminal)와 독일의 CTA(Container Terminal Alternwerder) 등에서 채택하고 있는 배치형태이다.

장치장은 하역장비의 작업 영역이 구분되는 블록으로 구성되고 블록은 1개의 컨테이너가 차지하는 길이 방향의 공간을 의미하는 야드 베이(bay)로 이루어진다. 본 연구는 블록 내에서 1 대의 ATC(Automated Transfer Crane)가 장치와 상하차 작업을 수행하는 것으로 가정한다. ATC는 해측의 작업지점(Transfer Point: TP)에서 내부 이송장비인 AGV(Automated Guided Vehicle) 또는 ALV(Automated Lifting Vehicle)와 연계작업을 하고 육측 작업지점에서는 외부 트럭과 연계작업을 처리한다.

Fig. 1에서 컨테이너선과 장치장 블록 사이에 이동하는 차량은 AGV 또는 ALV와 같은 내부 이송장비이고 각 블록의 양끝에 점선으로 표시된 영역에서 위쪽 부분이 해측 TP 그리고 아래쪽 부분이 육측 TP을 의미한다.

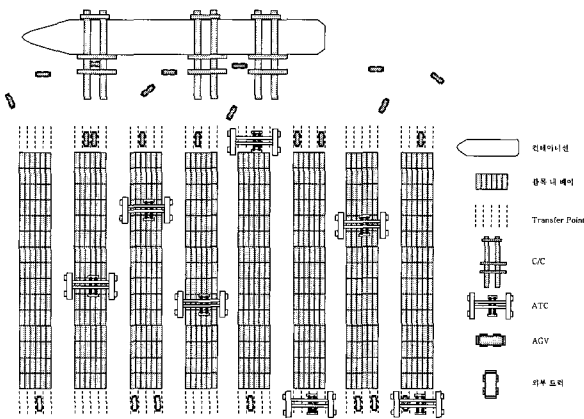


Fig. 1 Layout of automated container terminal

적하될 컨테이너들은 선박이 입항하기 일정 시점 이전까지 터미널 외부에서 반입되어 블록에 장치된다. 반면에 양하한 컨테이너들은 블록에 장치되었다가 일정 기간 내에 터미널 외부로 반출된다. 반입작업에서 ATC의 운반 거리는 반입 컨테이너가 육측 TP에서 블록 내 장치위치까지의 이동하는 거리이고 적하 컨테이너의 장치위치에서 해측 TP까지의 이동거리는 적하작업에서 ATC의 운반 거리이다. 따라서 수출 컨테이너를 위한 블록 내에서의 ATC 운반거리는 반입작업과 적하작업을 함께 고려할 때 육측 TP에서 해측 TP까지의 거리와 같다. 즉, ATC의 총 운반 작업 시간은 일정하다.

그러나 ATC가 어떤 시점에 사용되는지에 따라 작업시간의 가치는 다르다. 본선 작업과 반출입 작업 시간은 선사나 화주의 서비스 수준과 밀접한 관계를 가진다. 내부 이송장비 또는 외부 반출입 트럭과 ATC의 연계작업에서 ATC의 운반시간이 본선 및 반출입 작업시간에 큰 영향을 미친다. 그러므로 반입작업에서는 ATC의 운반거리를 최소화하기 위해서 컨테이너의 저장위치를 육측 TP에서 가까이 하는 것이 유리하다. 그러나 이는 해측 TP까지의 운반거리를 증가시키고 적하작업 시간을 증가시킨다. 따라서 수출 컨테이너를 해측 TP에 가깝게 장치하여 ATC의 이동거리가 단축하는 것이 적하작업의 생산성을 높인다.

작업 과정이 적하작업의 역순으로 진행되는 양하 컨테이너의 반출 과정도 동일한 특성을 따른다. 양하작업시에는 해측 TP 가까이에서 수입 컨테이너가 장치되는 것이 유리하다. 그렇지만 반출작업의 생산성 측면에서는 육측 TP 가까이에서 장치되는 것이 바람직하다.

본선작업 또는 반출입 작업에 소요되는 ATC의 작업시간 가치는 높고 반면에 이를 제외한 유휴시간에서는 상대적으로 작업시간의 가치는 낮다. 따라서 유휴시간을 활용하여 저장 위치를 변경하는 것은 단순한 총 이동시간에는 영향이 없지만 시간 가치는 달라지게 한다.

이송장비가 컨테이너가 장치된 베이까지 직접 이동하는 컨테이너 터미널의 장치장 계획에서는 적하 컨테이너의 목적항, 항차, 크기 등이 같은 동일 그룹의 컨테이너들이 동일 또는 근접한 베이에 장치될 수 있도록 노력한다. 이는 TC의 이동시간을 최소화하는 측면과 재취급 작업의 빈도를 줄이기 위한 목적이다. 이송장비가 블록 내부로 진입하지 않는 자동화 컨테이너 터미널에서는 이에 대한 요구가 크지 않은 것으로 알려져 있다. 그러나 서로 다른 그룹의 컨테이너가 한 베이 내에 혼재하게 되면 적하작업 시점의 차이에 따라 하단의 컨테이너를 끄집어내기 위해 상단의 컨테이너를 다른 위치로 옮기는 재취급 작업이 발생할 가능성이 높아지게 된다. 또한 상이한 특성의 컨테이너들이 한 베이 내에 혼재되면 재취급 작업의 발생 가능성을 줄이기 위해 가까운 시점에 적하 혹은 반출이 예상되는 컨테이너의 상단에 장치하지 않아 발생하는 장치 불가능 공간이 증가할 가능성이 높다.

따라서 자동화 컨테이너 터미널에서 적하 컨테이너들은 해측 TP에 가까운 베이에 동일 특성의 적하 컨테이너들과 함께 장치되는 것이 본선작업의 생산성 측면에서 유리하다. 반면에 반출 컨테이너의 경우에는 육측 TP 가까운 베이에 모아두는 것이 바람직하다. 따라서 이적계획 수립에서는 이적작업비용, 적하작업과 반출작업의 비용 그리고 재취급 작업 비용을 고려한다.

이적작업이 수행될 때 육측 TP와 가까운 베이에 장치된 수출 컨테이너는 해측 TP에 근접한 베이로 옮겨지고 수입 컨테이너는 반대의 흐름을 따르게 된다. 이를 위해서는 ATC의 운반작업과 이동작업이 필요하다.

Kim과 Bae(1998)의 연구에서 언급되었듯이 이적계획 문제

는 매우 복잡하기 때문에 단일 모형을 통해 문제를 풀기가 어렵다. 따라서 본 연구는 이적계획 문제를 선후 관계가 있는 2 단계의 하위문제들로 분할한다. 개략적인 과정이 Fig. 2에 묘사되어 있다.

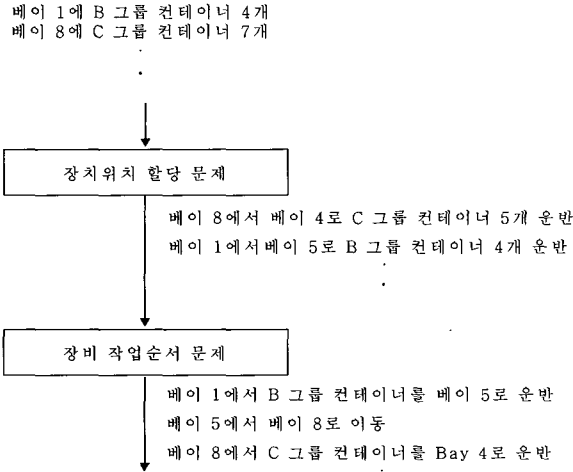


Fig. 2 Process of 2-step remarshalling planning

먼저, 장치되어 있는 적하 또는 반출 컨테이너들을 어느 베이에 얼마만큼 옮겨야 하는지를 결정하는 장치위치 할당문제이다. 이 단계에서는 재취급 비용을 줄이기 위해 이적 대상 컨테이너들이 장치되는 베이 수를 줄인다. 그리고 ATC의 이적작업에 따른 소요 시간을 최소화하면서 적하 컨테이너는 해측 TP 가까운 베이에 있도록 장치위치를 지정한다. 반출 컨테이너는 육측 TP에 가까운 베이로 옮긴다. 이때 이적되는 장치공간의 제약과 ATC의 빈 이동시간을 고려하지 않는다.

장비 작업순서 문제는 ATC가 개별 컨테이너를 이적하는 순서를 결정한다. 앞 단계에서 어느 베이로부터 어느 베이까지 몇 개의 컨테이너가 옮겨져야 할지를 결정하였다. 이를 처리하기 위해 ATC가 베이 사이를 이동하는 시간은 운반시간과 빈 이동시간으로 구성된다. 앞 단계에서 운반시간을 고려하였고 이 단계에서는 빈 이동시간을 최소화하는 순서를 고려한다. 그리고 작업 과정에서 장치위치의 공간 제약을 만족시켜야 한다. 각 베이는 장치 가능한 최대 장치량이 정해져 있다. 이적작업의 선후관계를 조정하여 작업 과정에서 어느 베이에서도 최대 장치량이 초과되지 않아야 한다. 이는 개별 컨테이너의 작업 순서를 결정하는 과정에서 고려될 수 있다.

3. 장치위치 할당문제

본 장에서는 먼저 장치위치 할당문제에 대한 본 연구의 가정들을 살펴본 후, 정수계획법을 이용한 최적화 모형을 자세히 소개한다. 본 연구는 취급 컨테이너의 크기가 동일하다고 보고 블록 내의 모든 베이이 이적이 가능한 장치 공간이고 ATC의 작업시간은 이적 컨테이너의 그룹과는 무관하다고 가

정한다. 그리고 블록 내 이적작업에서 이적 대상 컨테이너 그룹에 포함되지 않는 컨테이너들은 저장위치를 재배치하지 않는 것으로 가정하였다. 왜냐하면 블록 양끝에 장비간의 연계작업이 수행되는 컨테이너 터미널에서는 한 블록 내에 수출입 및 환적 컨테이너가 혼재되어 장치된 컨테이너들 중에서도 이적작업이 필요하지 않은 경우도 존재하기 때문이다.

이적작업에서 발생하는 재취급 작업은 ATC의 이적작업시간에 고려하지 않음으로써 이적작업에 소요되는 시간은 ATC의 운반시간 외에 pick up과 drop off 작업시간을 포함하는 것으로 가정하였다. 그리고 적하작업에서 발생할 수 있는 재취급 작업시간은 한 베이 내에 동일 그룹의 컨테이너들이 장치될 때 최소가 되는 것으로 가정한다. 이적계획을 수립하기 위한 혼잡정수계획모형에 사용되는 주요 기호와 의사결정변수는 다음과 같이 정리된다.

- α_1 : 적하작업 동안의 ATC 작업시간에 대한 가중치로 단위 시간당 비용을 의미
- α_2 : 반출작업 동안의 ATC 작업시간에 대한 가중치로 단위 시간당 비용을 의미
- β : 이적작업 동안의 ATC 작업시간에 대한 가중치로 단위 시간당 비용을 의미
- γ : 적하작업 동안에 재취급을 위한 ATC 작업시간에 대한 가중치로 단위시간당 비용으로 각 컨테이너 그룹이 한 베이 내에 최대 장치될 수 있는 베이 수를 초과하는 베이당 비용으로 산정
- B : 블록을 구성하고 있는 베이의 집합
- L : 이적작업이 고려되는 적하 컨테이너 그룹의 집합
- D : 이적작업이 고려되는 반출 컨테이너 그룹의 집합
- G : 이적작업이 고려되는 컨테이너 그룹의 집합, $LU D$
- E : 이적작업이 고려되지 않는 컨테이너 그룹
- C : 베이 내에 최대로 장치할 수 있는 컨테이너 수량
- M_k : 블록 내에 장치된 k 그룹 컨테이너가 필요로 하는 최소 베이 수, $k \in G$
- ST_i : i 베이에서 해측 TP까지의 ATC 운반시간, $i \in B$
- LT_i : i 베이에서 육측 TP까지의 ATC 운반시간, $i \in B$
- D_{ij} : i 베이에 있는 컨테이너 한 단위를 j 베이로 이적할 때 소요되는 시간, $i, j \in B$
- s_{ik} : 이적작업 이전에 i 베이에 있는 k 그룹 컨테이너의 수량, $i \in B$ 그리고 $k \in GUE$
- x_{ik} : 이적작업 이후에 i 베이에 있는 k 그룹 컨테이너의 수량, $i \in B$ 그리고 $k \in GUE$
- n_k : 이적작업 이후에 k 그룹의 컨테이너가 장치된 베이 수, $k \in G$
- e_{ik} : 이적작업 이후에 i 베이에 k 그룹의 컨테이너가 있으면 1 그렇지 않으면 0, $i \in B$ 그리고 $k \in G$

y_{ijk} : i 베이에서 j 베이로 이동한 k 그룹 컨테이너의 수량,
 $i, j \in B$ 그리고 $k \in G$

M : 아주 큰 수

$$\text{Minimize } \alpha_1 \sum_{i \in B} \sum_{j \in L} ST_{ij} x_{ij} + \alpha_2 \sum_{i \in B} \sum_{j \in D} LT_{ij} x_{ij} + \beta \sum_{i \in B} \sum_{j \in B, j \neq i} \sum_{k \in G} D_{ij} y_{ijk} + \gamma \sum_{k \in G} (n_k - M_k) \quad (1)$$

Subject to

$$x_{ik} - \sum_{j \in B, j \neq i} y_{jik} + \sum_{j \in B, j \neq i} y_{ijk} = s_{ik} \quad \text{for all } i, j \in B \text{ and } k \in G \quad (2)$$

$$\sum_{k \in G \cup B} x_{ik} \leq C \quad \text{for all } i \in B \quad (3)$$

$$\sum_{j \in B, j \neq i} y_{ijk} \leq s_{ik} \quad \text{for all } i, j \in B \text{ and } k \in G \quad (4)$$

$$x_{ik} - Me_{ik} \leq 0 \quad \text{for all } i \in B \text{ and } k \in G \quad (5)$$

$$n_k - \sum_{i \in B} e_{ik} = 0 \quad \text{for all } k \in G \quad (6)$$

y_{ijk} 는 정수형 for all $i, j \in B$ and $k \in G$

e_{ik} 는 0 또는 1 for all $i \in B$ and $k \in G$

식(1)은 이적계획 최적화 모형의 목적식으로 관련 작업을 수행하는데 소요되는 총비용을 최소화하는 것이다. 목적식의 첫 번째 항은 적하작업 시에 ATC가 컨테이너를 AGV 또는 ALV에 옮겨 신기 위해 해측 TP로 운반하는데 소요되는 운반시간에 대한 부분으로 각 그룹별 적하 컨테이너들이 장치된 위치에서 해측 TP까지 이동하는 거리와 수량이 곱하여 구해진 운반시간 비용을 의미한다. 두 번째 항은 반출작업에 관한 운반비용으로 계산방법은 첫 번째 항과 유사하다. 식(1)의 세 번째 항은 이적작업 시에 ATC 작업시간비용을 의미한다. 이는 각 컨테이너 그룹별로 이적작업이 이루어진 컨테이너 수량에 대해 운반시간과 pick up 및 drop off 시간으로 구성된 작업시간을 곱한 형태로 표현된다. 네 번째 항은 적하작업 시에 발생하는 재취급 작업비용을 나타낸다. 여기서 M_k 는 블록 내에 있는 k 그룹의 컨테이너 물량을 T_k 라 할 때 $\lceil T_k/C \rceil$ 를 의미한다. 예를 들면 T_k 이 36이고 C 가 21이면 M_k 는 2이다.

제약식 (2)는 각 베이별로 장치된 그룹별 컨테이너 수량은 초기 장치된 수량에서 다른 베이로 부터 이적되어온 컨테이너 수량과 다른 베이로 이적되어 나간 컨테이너 수량의 변화에 따라 결정되는 것을 나타낸다. 제약식 (3)은 각 베이에 장치되어 있는 컨테이너 수량과 빈 공간의 합이 한 베이의 최대 장치능력을 초과할 수 없다는 조건이다. 제약식(4)는 각 그룹별로 한 베이에서 이적되는 컨테이너 수량은 초기에 장치된 수량보다는 적다는 것을 의미한다. 제약식 (5)와 (6)는 이적작업 후에 특정 그룹의 컨테이너가 베이별로 장치되어 있는지 여부와 각 그룹의 컨테이너가 몇 개의 베이에 장치되었는지를 나타낸다.

4. 장비 작업순서 문제

장비 작업순서 문제는 장치위치 할당문제에서 도출된 운반작업을 ATC가 어떤 순서로 수행해야 하는지를 결정한다. 개별 컨테이너별로 ATC의 작업순서를 결정하기 때문에 ATC의 빈이동거리도 함께 고려된다. 그리고 작업순서에 따라 일시적으로 장치공간의 제약으로 작업이 불가능한 경우도 발생한다.

본 문제에서는 개별 컨테이너를 옮기는 과정에서의 재취급 시간을 고려하지 않고 이적작업 후 베이 내에서의 재취급 작업에 미치는 영향도 고려하지 않는 것으로 가정한다. 또한 장비의 이동에서 가감속에 따른 차이가 없다고 가정하므로 이동시간은 이동거리에만 관련된다.

본 연구의 장비 작업순서 문제는 비대칭 외판원 순회 문제 (asymmetric traveling salesman problem: ATSP)로 모형화될 수 있다. 여기서, 방문 노드(node)는 장비가 처리해야 하는 과업을 의미한다. 유희 상태의 ATC는 임의의 노드에서 출발하여 각 노드를 한번씩만 거쳐 모든 노드를 방문한다. 앞서 장치위치 결정 문제에서 구해진 베이간 이적작업은 ATC가 처리해야 하는 과업 대상이고 이를 개별 컨테이너 단위로 나눈 것이 실질적으로 작업순서 문제에서 다루는 ATC의 과업이다.

노드간의 거리는 비대칭 구조를 가진다. 이때 각 노드간의 거리 d_{ij} 는 선행 과업이 종료된 베이 위치에서 후행 과업을 수행하기 위해 이동하는 시간을 의미한다. 예를 들어 노드 i 가 베이 5에서 베이 8로 A그룹 컨테이너를 이적하는 과업이고 노드 j 가 베이 4에서 베이 1로 B 그룹 컨테이너를 이적하는 과업이라고 하자. 그러면 d_{ij} 는 ATC가 베이 8에서 베이 4로 빈 이동하는 시간 40초이고 d_{ji} 는 베이 1에서 베이 5로 이동하는 40초이다. 즉, 과업의 선후 관계에 따라 ATC가 다음 과업 수행을 위해 빈 이동하는 거리는 선행 과업이 종료되는 위치와 후행 과업의 시작 위치에 따라 달라진다.

장비 작업순서 문제에서는 장치공간 제약이 고려되어야 한다. 따라서 ATSP에서는 최단 방문 경로를 발견하는 과정에서 베이별 최대 장치 용량이 초과되지 않는 방문순서를 제시해야 한다. 예를 들어 선행 과업의 이적을 통해 베이의 장치량

이 최대 장치량에 도달한 경우에 다시 이 베이로 이적하는 후 행과업의 수행은 베이 최대 장치량을 초과하므로 불가능한 방문 순서가 된다.

본 연구는 제약이 있는 동적계획법을 ATSP에 적용한다. 이를 위해 필요한 기호들은 아래와 같다.

N : 노드의 수

n : 방문 순서에 해당하는 단계, $n = 1, 2, \dots, N$

I_n : 단계 1에서 단계 n 까지 방문한 노드의 집합

K_n : 단계 n 에서 방문하는 노드

$f_n(I_n, K_n)$: 단계 1에서 단계 n 까지의 경로에서 I_n 에 속하는 모든 노드를 방문하고 마지막으로 K_n 노드를 방문하는 경우의 최소비용함수

그때 순환함수(recursive equation)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_n(I_n, K_n) = \min_{K_{n-1} \in I_n - \{K_n\}} \{d_{K_{n-1}, K_n} + f_{n-1}(I_n - \{K_n\}, K_{n-1})\}$$

, 여기서 $I_n = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ 이고 모든 I_1 과 K_1 에 대한 $f_0(I_0, K_0) = 0$ 임.

목적함수의 최소값은 $\min_{K_n} f_n(I_n, K_n)$ 를 통해 평가된다.

ATSP의 최적해를 구하기 위해 제안된 동적계획모형은 전진적 방법(forward method)을 사용해서 단계 1에서 시작하여 전진하면서 단계 n 의 최종 마디에 이르는 최단경로를 계산한다. 전개과정에서 상태 (I_n, K_n) 는 공간 타당성을 검토 후에 성립된다. K_n 이 나타내는 과업에서 컨테이너가 놓여지는 베이의 누적 장치공간이 가용해야 함을 의미한다. 따라서 동적계획법의 진행 과정에서 베이별 누적 장치공간은 갱신된다. 방문 노드에서 옮겨질 컨테이너의 현 베이 위치에 대해서는 (-)가 적용되고 이적되는 베이에는 (+)가 적용된다.

5. 적용예

본 장에서는 앞서 제시한 수리모형들의 적용 과정을 설명하기 위해 간단한 예제를 제시하고자 한다.

5.1 장치위치 할당문제 적용예

예제에서 이적작업이 수행되는 블록은 8개의 베이로 구성된다. 이적 대상 컨테이너들은 4 종류의 그룹으로 분류되며 그룹 A와 B는 적하 컨테이너 그룹이고 그룹 C와 D는 반출 컨테이너 그룹이다. 각 그룹별 컨테이너들이 블록 내에 장치된 베이 위치와 수량은 Table 1과 같다. 각 베이에는 컨테이너를 4단 6열로 장치할 수 있지만 최대 장치가능 수량은 재취급 작업을 감안하여 21개로 정한다. 그리고 ATC가 1베이를 이동하

는데 소요되는 시간은 10초이고 해측 TP를 이동하기 위해서는 1 베이를 더 이동하는 것으로 설정하고 이적작업에서 ATC의 pick up과 drop off 작업에 소요되는 시간은 30초로 가정한다.

Table 1 Initial storage layout before remarkshalling

Group Bay no.	A	B	C	D	other	empty	capa.
1	1	3	3	5	4	5	21
2	0	1	6	5	3	6	21
3	1	3	4	6	5	2	21
4	0	4	0	2	9	6	21
5	6	0	3	1	2	9	21
6	7	3	3	0	0	8	21
7	5	2	1	2	5	6	21
8	6	5	2	2	5	4	21
소계	26	21	22	23	30	46	168

Table 2 Remarkshalling planning

To From	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	-	-	-	-	C(1)	D(1)	C(2) D(4)
2	B(1)	-	-	-	-	-	D(5)	C(6)
3	-	A(1)	-	-	-	C(4)	D(6)	-
4	-	-	B(4)	-	-	-	D(2)	-
5	A(1)	A(5)	-	-	-	C(2)	-	C(1) D(1)
6	A(2)	A(5)	B(3)	-	-	-	-	-
7	A(3)	A(2)	B(2)	-	-	-	-	C(1)
8	A(1) B(5)	A(5)	-	-	-	-	-	-

Table 2는 α_1 과 α_2 를 60,000원/초, β 를 1,000원/초 그리고 γ 를 100,000원/베일로 설정하여 구한 최적해에서 이적작업을 요약한 표이다. 표에서는 각 그룹의 컨테이너들이 현재 장치된 베이에서 다른 베이로 몇 개가 옮겨지는 지를 보여준다. Table 3은 이적작업이 완료된 후 각 그룹별 컨테이너들이 블록 내에서 장치된 베이 위치와 수량으로 정리한 것이다. Table 1과 Table 3을 비교하면 대상 컨테이너들이 해측 TP 또는 육측 TP에 가까운 베이로 재배치되고 한 베이 내에 혼재되는 컨테이너 그룹의 수가 적어지면서 동일 그룹의 컨테이너들이 한 베이에 장치되는 경향이 확인된다. 이적작업 전후의 차이를 정리하면 이적작업을 통해 재배치된 컨테이너는 총 76개이다. 이적 대상 컨테이너들의 단축된 총운반 시간은

3,370초이다. 적하 컨테이너의 경우에 이적작업 전에 2,610초가 소요되는 것이 이적작업 후에는 890초가 소요되는 것으로 1,720초가 단축된다. 반출 컨테이너의 경우에는 2,460초에서 810초로 1,650초가 단축된다. 이때 이적작업에 소요된 ATC의 작업시간은 5,650초이다.

Table 3 Storage layout after remarshalling

그룹 베이 번호	그룹						
	A	B	C	D	other	empty	capa.
1	8	9	0	0	4	0	21
2	18	0	0	0	3	0	21
3	0	12	0	0	5	4	21
4	0	0	0	0	9	12	21
5	0	0	0	0	2	19	21
6	0	0	10	0	0	11	21
7	0	0	0	16	5	0	21
8	0	0	12	7	2	0	21
소계	26	21	22	23	30	46	168

5.2 장비작업순서 적용예

본 절에서는 장치위치 할당문제의 결과에 동적계획 모형을 적용한 예제를 살펴본다. 앞의 예제에서 베이 4에서 베이 5로 이적되는 A그룹의 컨테이너가 5개이면 과업의 수는 5가 된다. 따라서 앞의 예에서 이적 컨테이너의 수가 76개이므로 장비작업순서 문제에서 다루는 과업의 수는 76이고 방문해야 하는 노드의 수도 76개 이다. 즉, 이때 블록 내에서 하역작업을 수행하는 한 대의 ATC가 처리해야 하는 과업의 수와 노드의 수는 동일한 의미이다. Table 4는 앞의 장치위치 결정 문제의 결과를 분해하여 노드에 배정하고 작업시작 베이와 작업종료 베이 그리고 컨테이너 그룹을 정리한 것이다. ATC의 베이간 빈 이동시간은 10초이고 베이 내에서의 pick up 및 drop off 시간은 동일하다고 가정한다. 따라서 d_{ij} 는 순수하게 선후과업 사이의 이동시간을 의미하며 Table 5는 각 노드간의 d_{ij} 에 대한 일부 값을 정리한 것이다. Fig. 3은 작업순서 문제의 최적해에서 첫 10개의 작업순서를 정리한 것으로 ATC의 이동경로와 각 베이에서 장치량의 변화를 보여준다. 최적해에서 ATC의 총 빈 이동시간은 500초로 산출되었다.

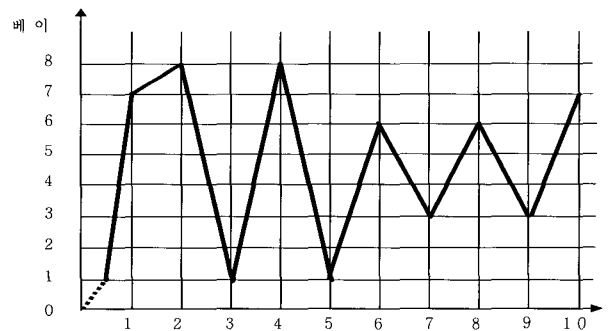
Table 4 Tasks matching with nodes

노드 번호	그룹	시작 베이	종료 베이	노드 번호	그룹	시작 베이	종료 베이
1	A	3	2	39	B	8	1
2	A	5	1	40	B	8	1
3	A	5	2	41	C	1	6

4	A	5	2	42	C	1	8
5	A	5	2	43	C	1	8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
33	B	6	3	71	D	3	7
34	B	7	3	72	D	3	7
35	B	7	3	73	D	3	7
36	B	8	1	74	D	4	7
37	B	8	1	75	D	4	7
38	B	8	1	76	D	5	8

Table 5 Travel time between node i and node j

i \ j	1	2	3	4	5	...	72	73	74	75	76
1	-	30	30	30	30		10	10	20	20	30
2	20	-	40	40	40		20	20	30	30	40
3	10	30	-	30	30		10	10	20	20	30
4	10	30	30	-	30		10	10	20	20	30
5	10	30	30	30	-		10	10	20	20	30
⋮											
72	40	20	20	20	20		-	40	30	30	20
73	40	20	20	20	20		40	-	30	30	20
74	40	20	20	20	20		40	40	-	30	20
75	40	20	20	20	20		40	40	30	-	20
76	50	30	30	30	30		50	50	40	40	-



No. of node \ No. of bay	58	57	20	42	36	41	31	50	32	68
1	16	15	15	16	15	16	15	15	15	15
2	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
3	19	19	19	19	19	19	19	20	19	20
4	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
6	13	13	13	13	13	13	14	13	14	13
7	15	16	15	15	15	15	15	15	15	16
8	17	17	18	17	18	17	17	17	17	17

Fig. 3 Results of operation sequencing problem

예제에 본 연구에서 제시한 모형을 적용하여 이적작업을 수행할 때 항목별 비용 변동을 Table 6에 정리하였다. 비용 산정에 있어 앞서 설정한 비용 계수 외에 C는 21개, 이동작업시간의 초당 비용은 500원으로 가정하였다. 이적작업을 통해 감소하는 비용은 204,100천원이고 추가 발생하는 비용은 3,620천원으로 200,480천원의 이적 효과가 발생하였다.

Table 6 Difference between before and after of remarshalling in terms of cost

항 목	이적작업 전	이적작업 후	비교
적하 컨테이너 운반작업시간비용	156,600천원	53,400천원	103,200천원 감소
반출 컨테이너 운반작업시간비용	147,600천원	48,600천원	99,000천원 감소
재취급 비용	A 그룹: 4베이 B 그룹: 6베이 C 그룹: 5베이 D 그룹: 5베이	A 그룹: 0베이 B 그룹: 1베이 C 그룹: 0베이 D 그룹: 0베이	1,900천원 감소
운반작업시간비용	-	3,370천원	3,370천원 증가
이동작업시간비용	-	250천원	250천원 증가

6. 결론 및 추후연구

본 연구에서는 자동화 컨테이너 터미널에서 적하작업 및 반출작업을 신속하게 처리하기 위해 컨테이너의 장치위치를 재배치하는 이적계획을 다루었다. 이적계획에서는 적하작업 시 재취급 작업의 발생 가능성을 줄이기 위해 동일 그룹의 컨테이너를 동일 베이 내에 모을 뿐 아니라 적하작업 및 반출작업에서 ATC의 운반시간을 줄이기 위해 TP 가까운 지점으로 옮겨주는 것도 함께 고려하였다. 터미널 운영자에게 이적계획은 추가적인 운반작업을 요구하기 때문에 어떤 컨테이너를 어느 장치위치에 옮길 것인지를 계획하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 이적계획 문제의 복잡성을 감안하여 이를 2단계의 하위문제, 장치위치 할당문제와 장비 작업순서 문제로 분할하였다. 장치위치 할당문제를 위해 적하 및 반출작업에서 ATC 운반시간비용 및 재취급 작업비용 그리고 이적작업에 따른 운반시간비용을 고려한 총비용을 최소화하는 혼합정수 계획모형을 제안하였다. 이적작업에서 장비의 빈 이동시간을 최소화하면서 장치공간의 가용성을 고려하여 장비 작업순서 문제를 비대칭 외판원 순회 문제로 모형화하고 이를 풀기 위한 동적계획모형을 제시하였다. 그리고 수리적 모형의 적용 과정을 보여주기 위한 예제를 정리하였다.

향후 연구로는 본 연구에서 다룬 장치위치 할당문제와 장비 작업순서 문제를 실시간으로 해결할 수 있는 효율적인 방법에 관한 논의가 필요할 것으로 사료된다.

이적작업은 적하 및 반출작업에 유리한 장치공간을 사용하기 때문에 각각은 양하 및 반입작업이 선호하는 장치공간을

줄이게 된다. 따라서 이적작업을 통해 감소될 수 있는 적하 및 반출작업시간과 양하 및 반입작업에서 증가되는 작업시간의 관계를 함께 고려하는 연구도 이적작업의 실질적인 효과를 검토하는데 중요한 추후 연구라고 판단된다.

후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(KRF-2005-003-F00025)

참 고 문 헌

- [1] 강제호, 오명섭, 류광렬, 김갑환(2005), "컨테이너 터미널 장치장에서 블록 내 이적을 위한 컨테이너 이동 순서 계획," 한국항해항만학회지, 제29권, 제1호, pp.83-90.
- [2] 김동조, 박영택(1996), "Planning 기반 컨테이너 장치 계획 시스템," 한국지능정보시스템, 제5권, 제1호, pp. 145-166.
- [3] 박강태(1997), "모델변경의 용이성을 고려한 컨테이너 터미널의 공간할당 계획", 석사학위 논문, 부산대학교.
- [4] 윤원영, 이주호, 최용석(2003), "시뮬레이션을 이용한 자동화 컨테이너 터미널의 이적 규칙에 관한 연구," 한국시뮬레이션학회논문지, 제12권, 제3호, pp. 21-29.
- [5] Castilho, B. D. and Daganzo, C. F.(1993), "Handling Strategies for Import Containers at Marine Terminals," Transportation. Research-A, Vol. 27B, No. 2, pp. 151-166.
- [6] Kim, K. H. and Bae, J. W.(1998), "Re-marshalling Export Containers in Port Container Terminals," Computers & Industrial Engineering, Vol. 35, Nos 3-4, pp. 655-659.
- [7] Kim, K. H. and Kim, H. B.(1999), "Segregating Space Allocation Models for Container Inventories in Port Container Terminals," International Journal of Production Economics, Vol. 59, pp. 415-423.
- [8] Kim, K. H., Park, Y. M., and Ryu, K. R.(2000), "Deriving Decision Rules to Locate Export Containers in Container Yard", European Journal of Operational Research, Vol. 124, pp. 89-101.
- [9] Mounira, T. I., Castilho, B. D., and Daganzo, C. F.(1993), "Storage space vs handling work in container terminals," Transportation Research-A, Vol. 27B, No. 2, pp. 13-32.

원고접수일 : 2006년 6월 13일

원고채택일 : 2006년 8월 25일